

电机学

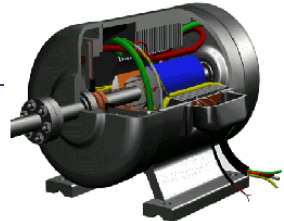
同步电机的基本理论和运行特性

东南大学电气工程学院

黄允凯



东南大学
电气工程学院



1

同步电机的结构

2

同步电机的励磁系统

3

同步电机的空载运行

4

对称负载时的电枢反应

5

隐极同步发电机的分析方法

6

凸极同步发电机的分析方法

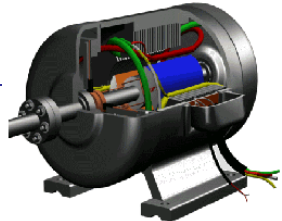
7

电枢绕组的漏抗

8

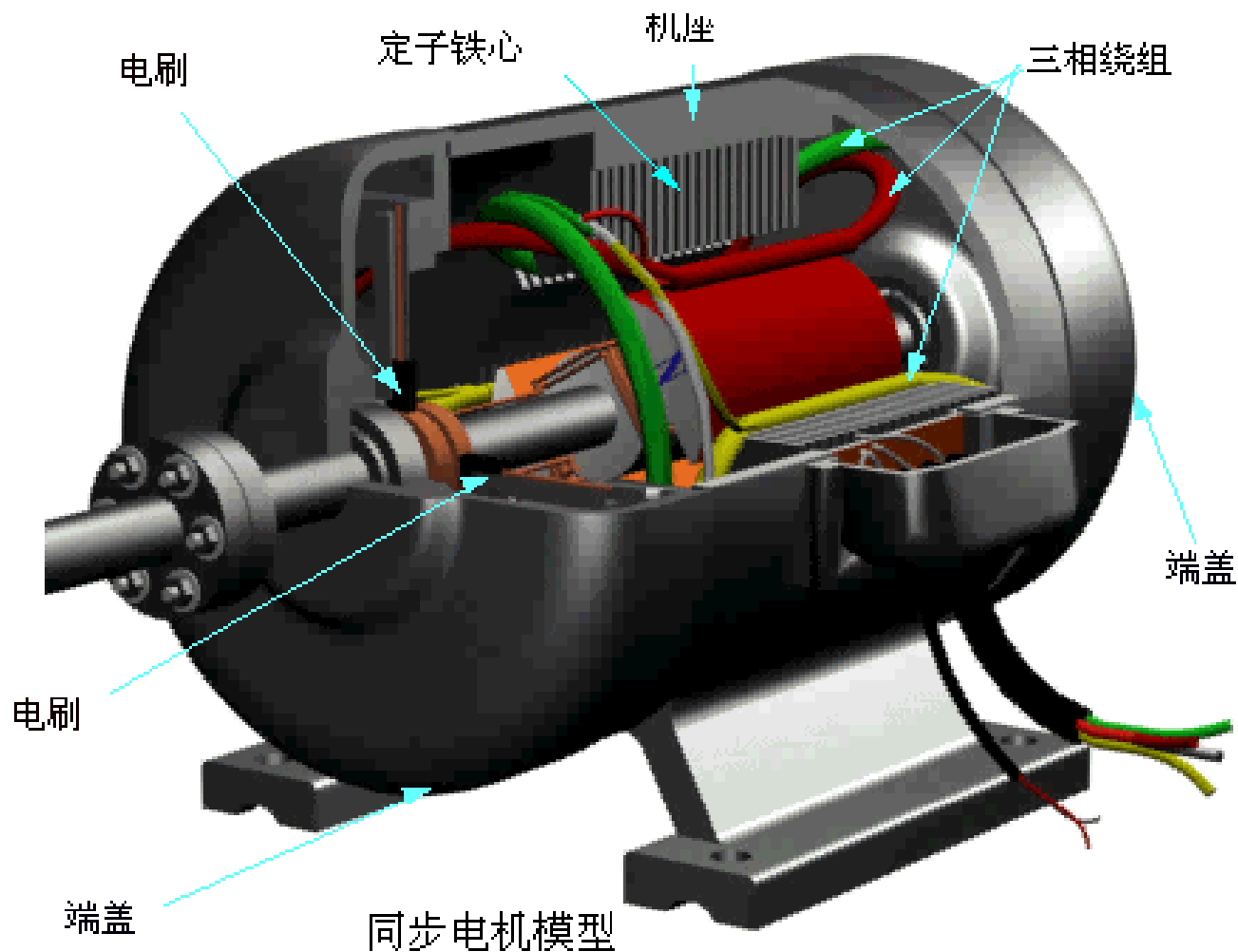
同步发电机的空载、短路和负载特性



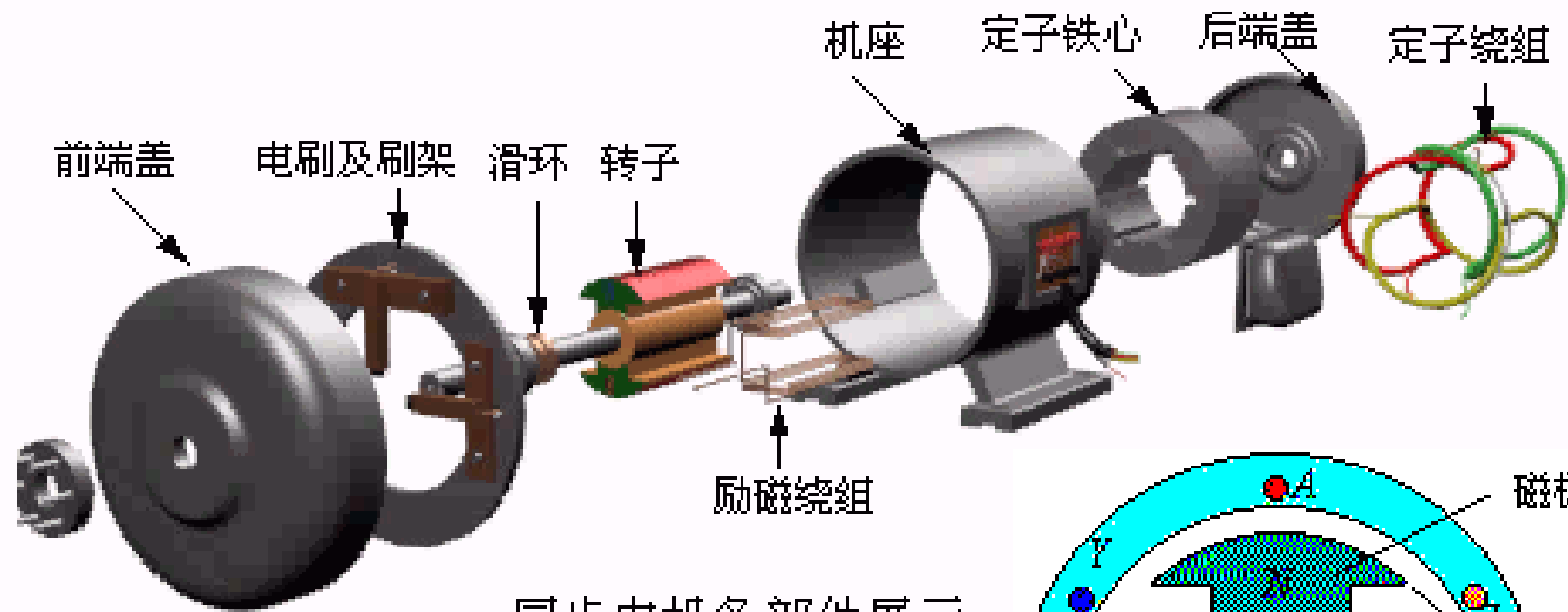
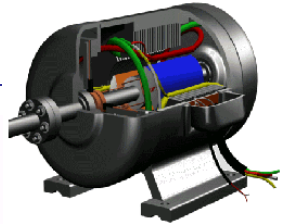


回顾一下同步电机基本原理

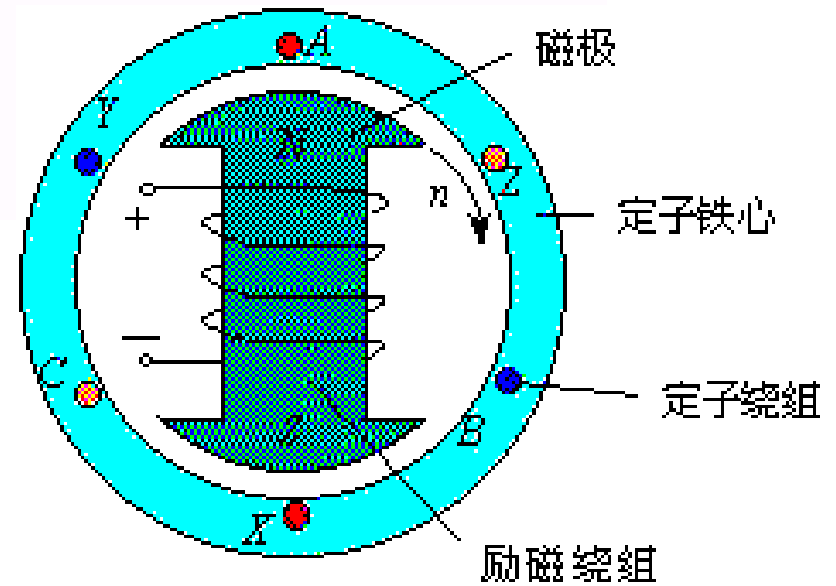
定子上为三相对称绕组，匝数相同，空间位置互差 120° ，转子上装有励磁绕组，通入直流电将产生一个磁场，它匝链定子各绕组



同步电机的结构

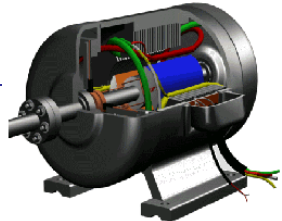


同步电机各部件展示

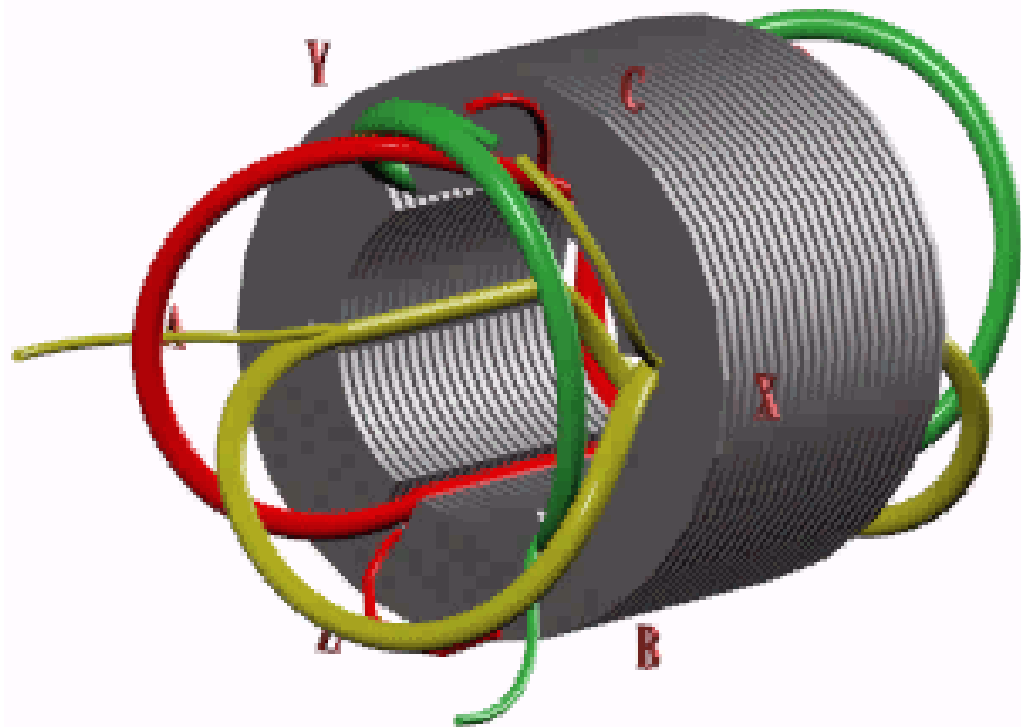


同步电机结构模型



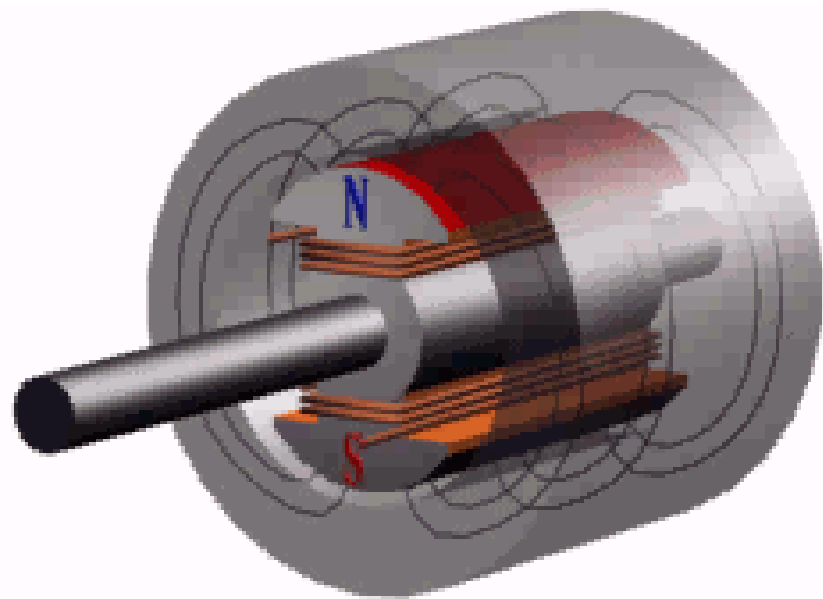
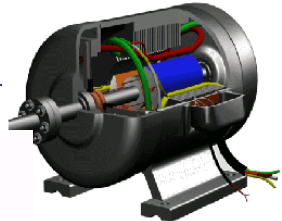


同步电机与异步电机主要结构部件对比



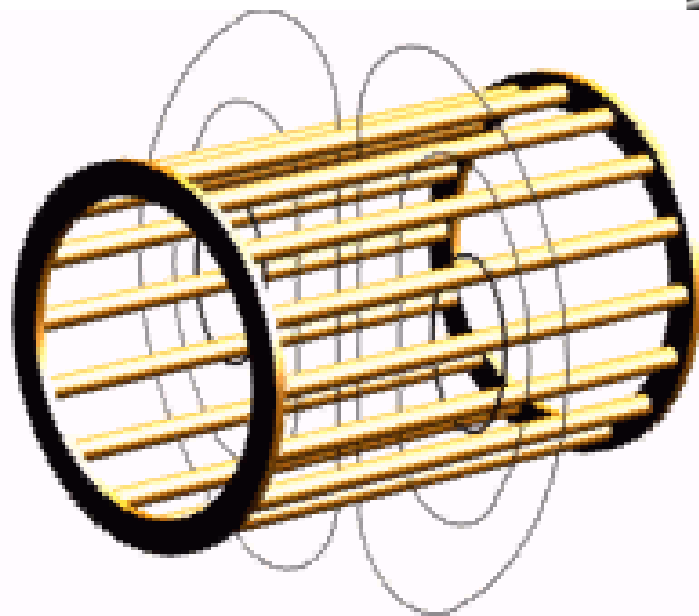
从交流电机的结构上来看，同步电机的定子铁心和定子绕组与异步电机的完全一样，而且它们的转子铁心也都由导磁材料构成。两者的区别就在于转子结构。





同步机的转子

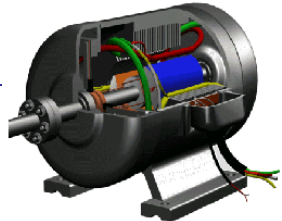
在同步电机中，转子是主磁极，当外加的直流励磁电流流入转子绕组时，转子铁芯便表现出固定的极性，随转子一起旋转，相当于一块旋转的磁铁



异步机的转子绕组

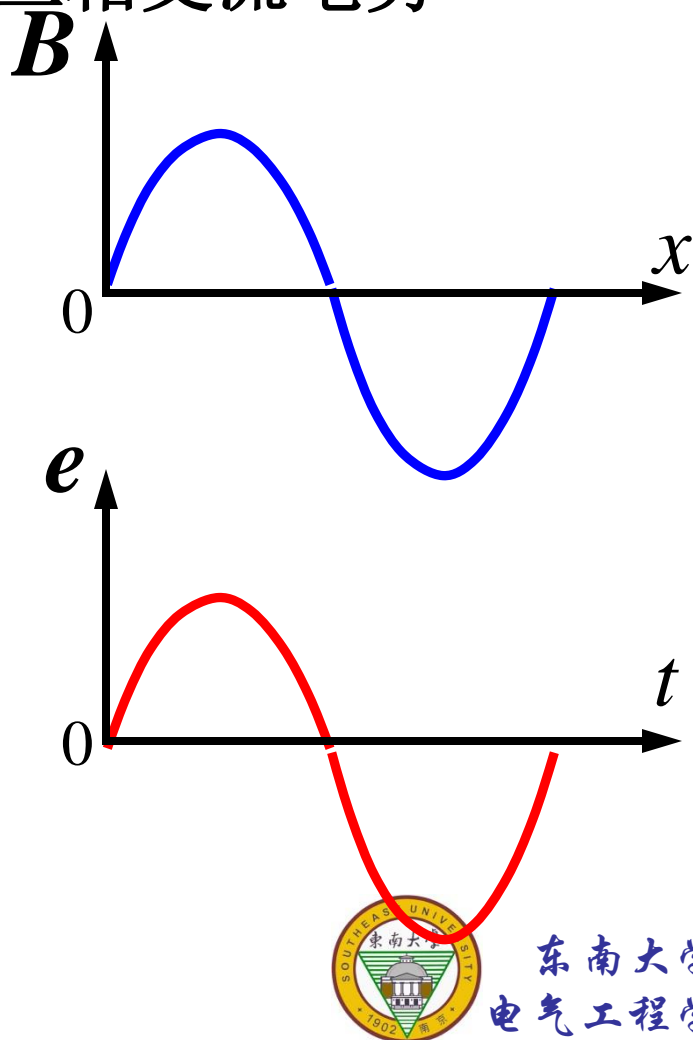
在异步电机中转子绕组是一个自行闭合的绕组，当气隙磁场切割转子绕组时，便会在转子绕组中感应电势产生电流，转子铁芯便表现为表面旋转变化的磁极

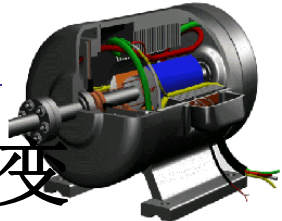




同步发电机基本原理

- 原动机带动转子旋转，则磁场与定子绕组间有相对运动，在定子绕组中感应出三相交流电势
- 电势的频率取决于电机的
 - 极对数
 - 转子的转速
- 每一导体的速度电势为
 - $\mathbf{e} = \mathbf{B} \mathbf{l} \mathbf{v}$
- 电势的波形取决于
 - 电机气隙磁密的空间分布
 - 正弦分布得到正弦电势





- 导体经过一对磁极，导体中的感应电势 $e(t)$ 就变化了一个周波
- 若转子旋转一周经过 p 对极，那么导体中所感应的电势就变化了 p 个周波。
- 电势的频率为： $f = pn / 60$
- 当转速 n 与极对数 p 一定时，发电机发出交流电的频率也就固定
- 当极对数和频率一定时，同步发电机的原动机必须有相应的固定转速，即为同步转速

$$n_1 = 60 f / p$$





同步电动机基本原理

- 定子绕组接频率为 f 的三相交流电源
- 电机极对数为 p
- 气隙中产生转速为 n_1 的旋转磁场
- 旋转磁场将吸住转子磁极一起旋转
- 它们有相同的转速和转向

$$n = n_1 = 60 f / p$$



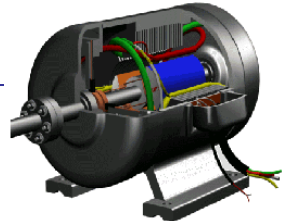


- 同步电机无论作为发电机或电动机，它的转子转速总等于由电机极对数和电枢电流频率所决定的同步转速

$$n_1 = 60f / p$$

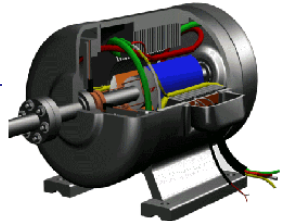
- “同步”机因而得名



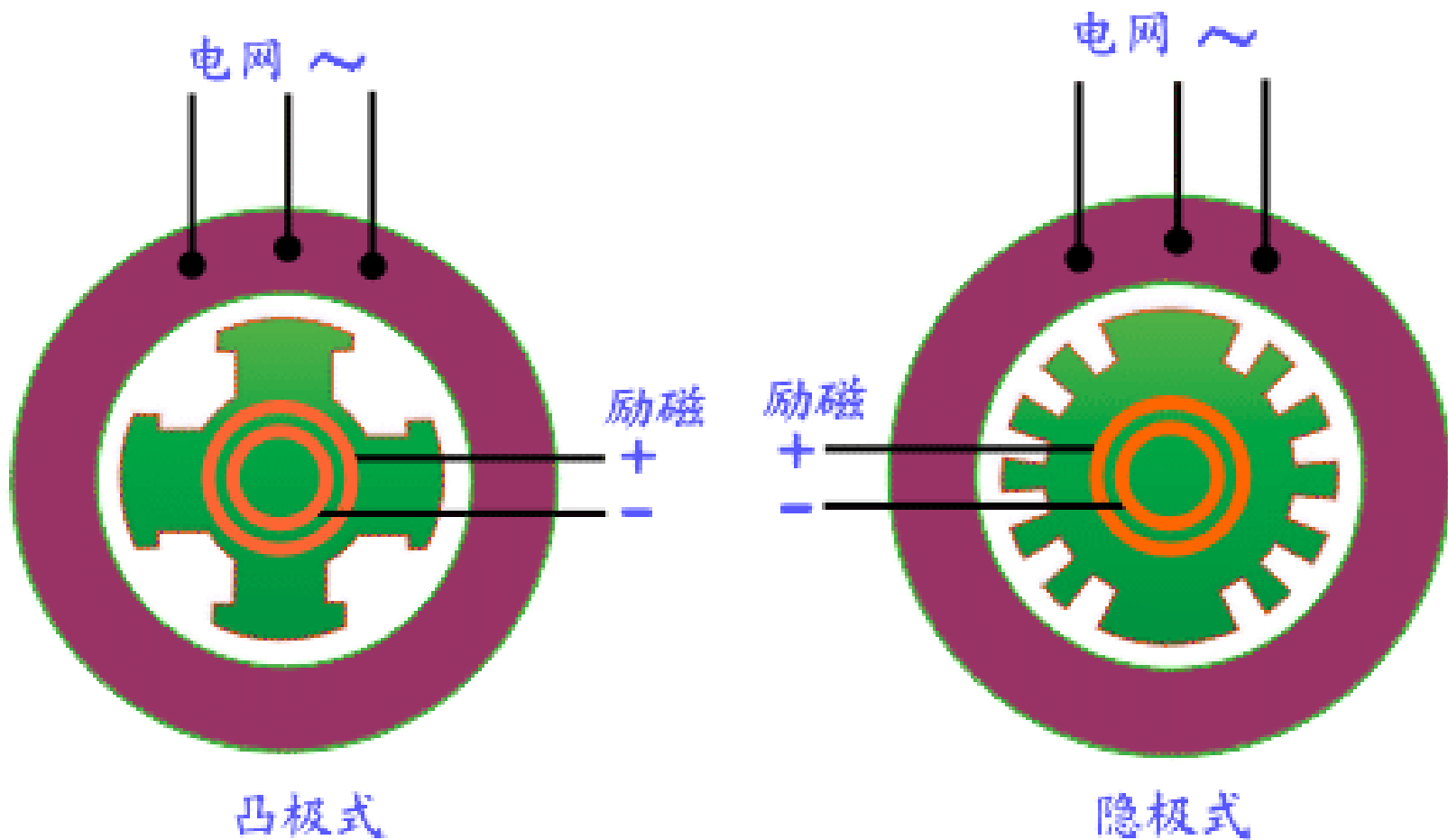


- 同步电机一般为磁极旋转式
 - 即以电枢为定子，磁极为转子。
 - 电枢功率极大，电压高
 - 激磁功率较小，电压低
 - 大功率不宜通过滑动接触引入引出
 - 激磁电流可通过集电环引入到转子





同步电机的转子有两种构造型式





汽轮机 + 同步机



汽轮发电机组

水轮机 + 同步机



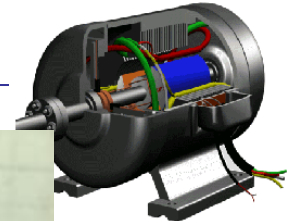
水轮发电机组





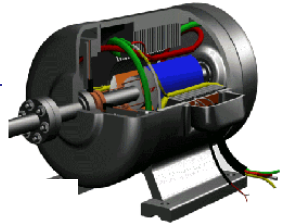
- 汽轮发电机都为**隐极式**
 - 汽轮机高速时较为经济
 - 一般都为两极机，转速为3000r/min
- 汽轮发电机组一般为**横轴式**
- 水轮发电机都为**凸极式**
 - 水轮机转速较低
 - 转速为每分钟数十转至数百转，依水头高低、流量大小而定
 - 水轮发电机的极数就很多
- 水轮发电机组一般为**竖轴式**



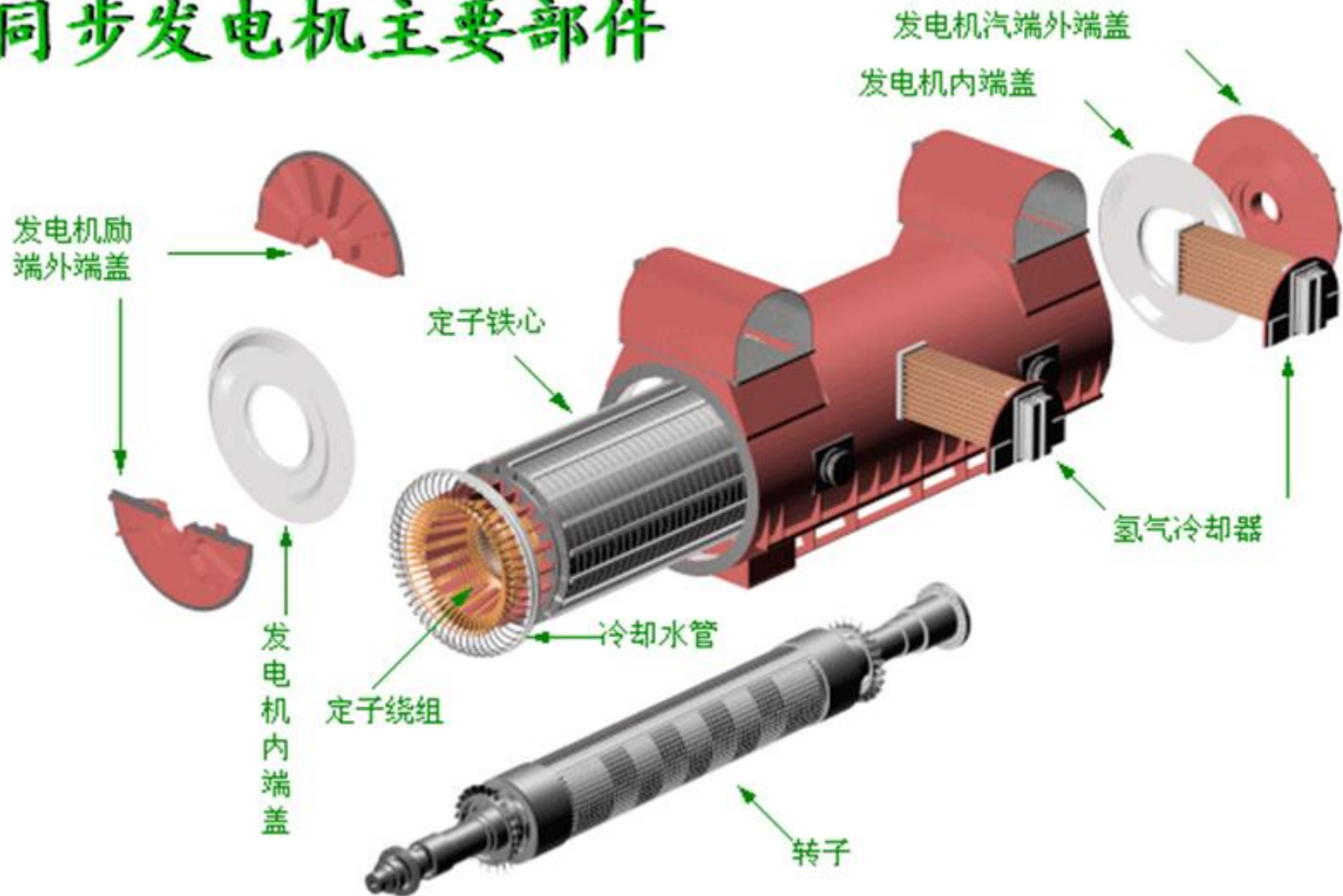


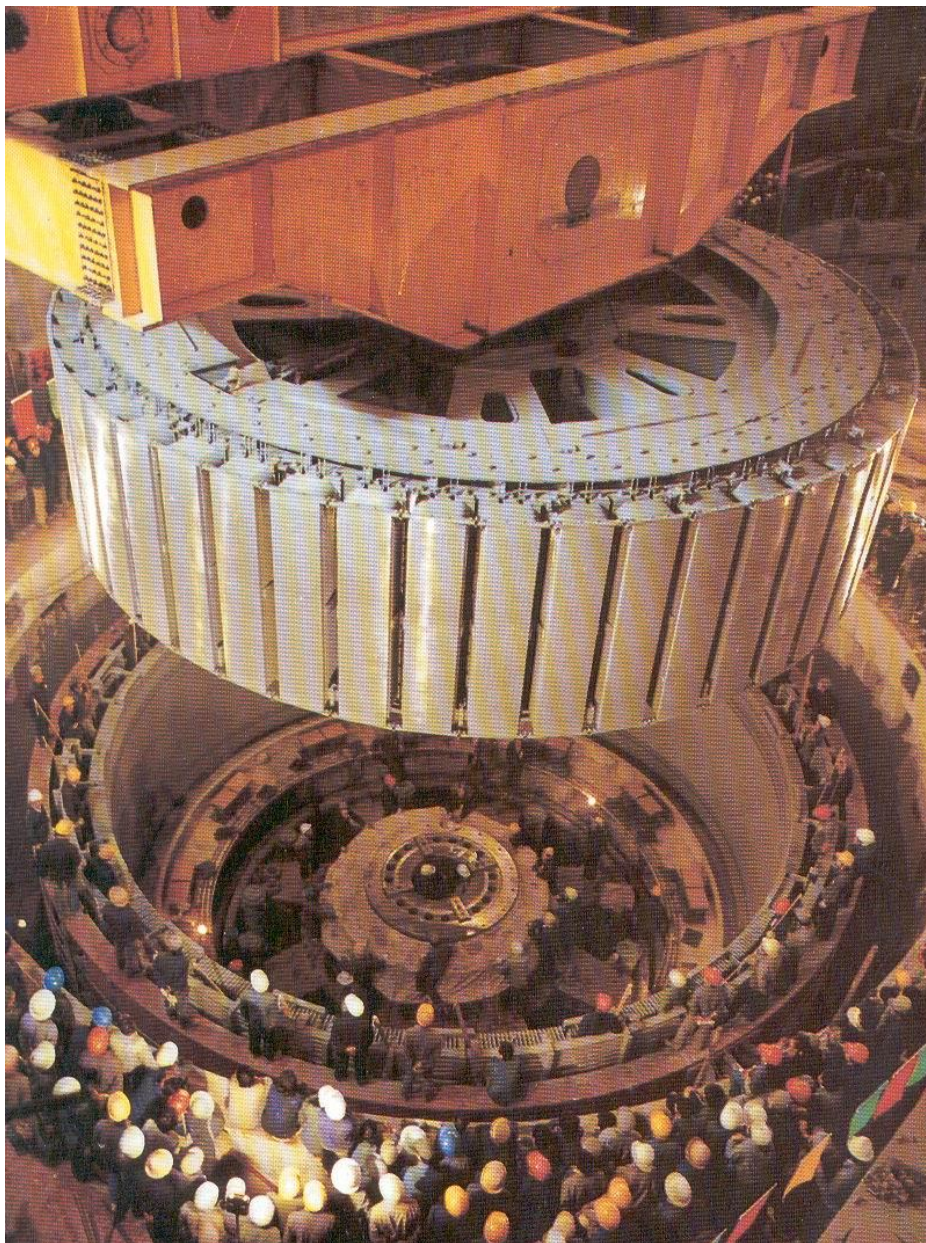
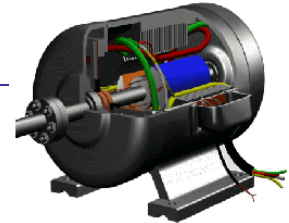
200MW汽轮发电机组的实物照片





同步发电机主要部件

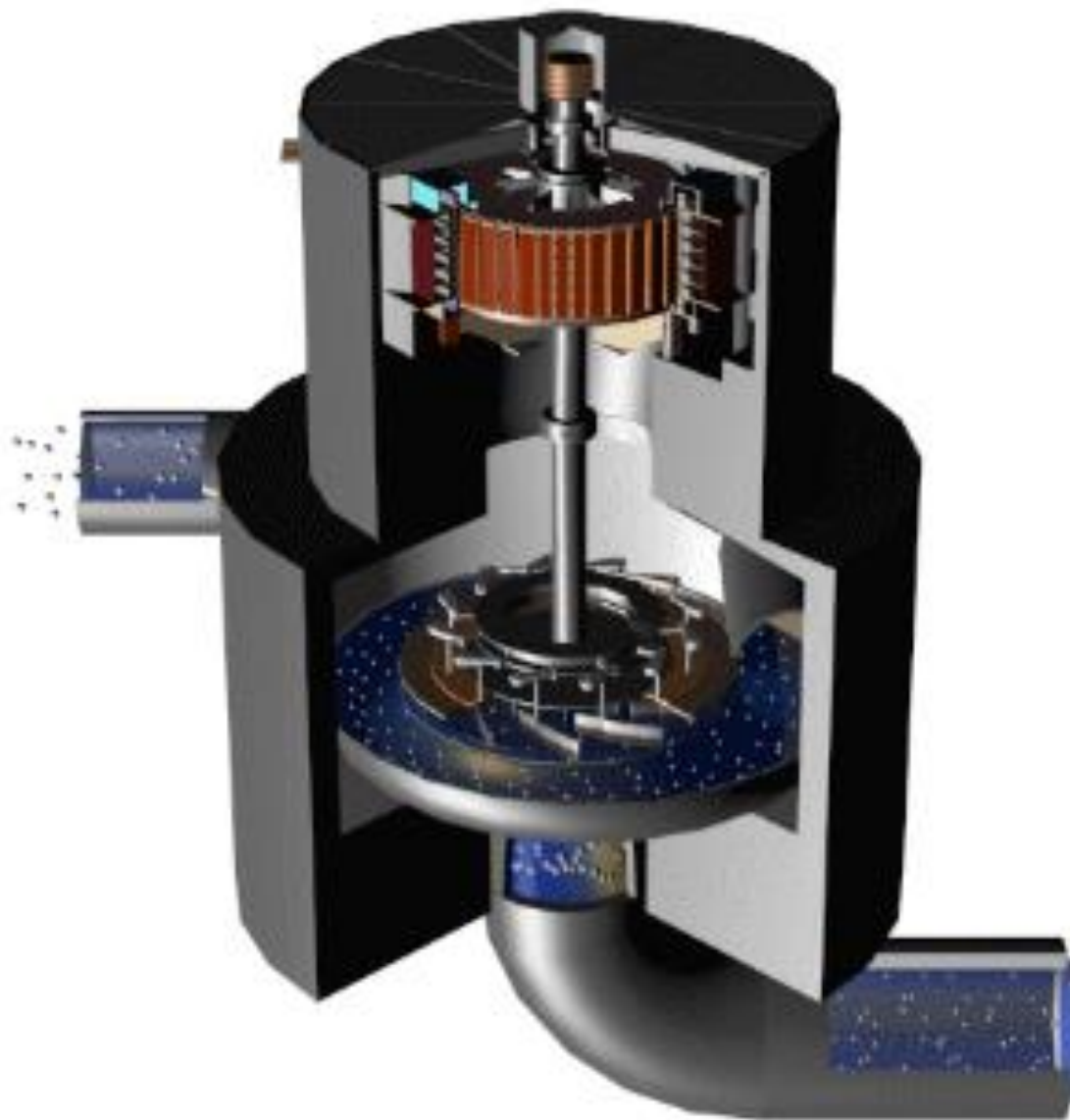




320MW水轮发电
机转子吊装



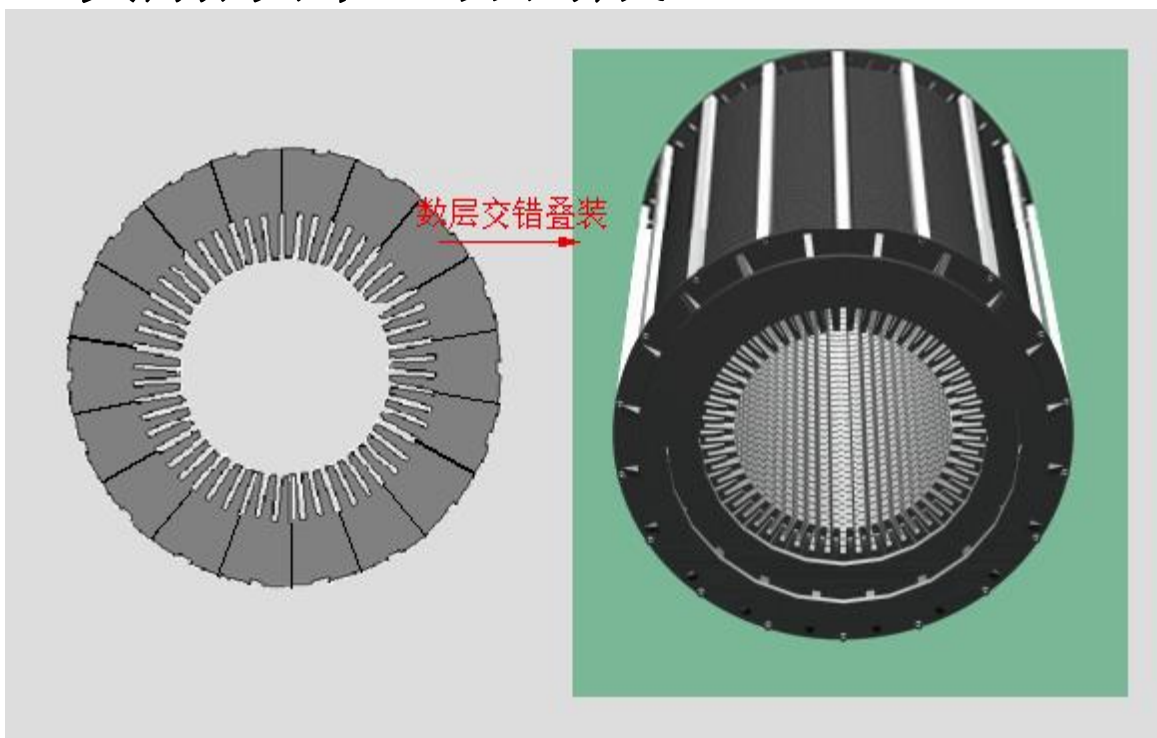
同步电机的结构

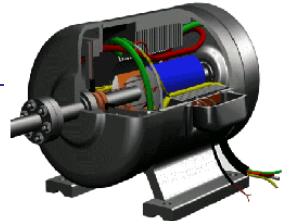




汽轮发电机的构造特点

- 定子：
 - 铁芯由厚度为0.35或0.5mm的电工钢片叠成
 - 小型电机的定子钢片可以整块冲成
 - 定子铁芯的外径较大时, 每层钢片常由若干块扇形片组合而成





– 定子的机座

- 常由钢板焊接而成
- 与外壳和端盖构成仅与风室沟通的密封系统

– 端盖

- 常用非磁性材料铸造而成
- 一般制成左右两半。

– 定子绕组

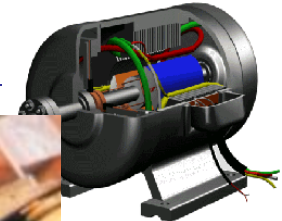
- 一般均采用双层三相对称绕组
- 定子槽型均系矩形开口槽
 - 为了便于绕组下线
- 常由若干根截面较小的铜线并绕而成
 - 电流极大，为了减小导体中的集肤效应





大型汽轮发电机定子铁心槽





300MW汽轮发电机定子下线





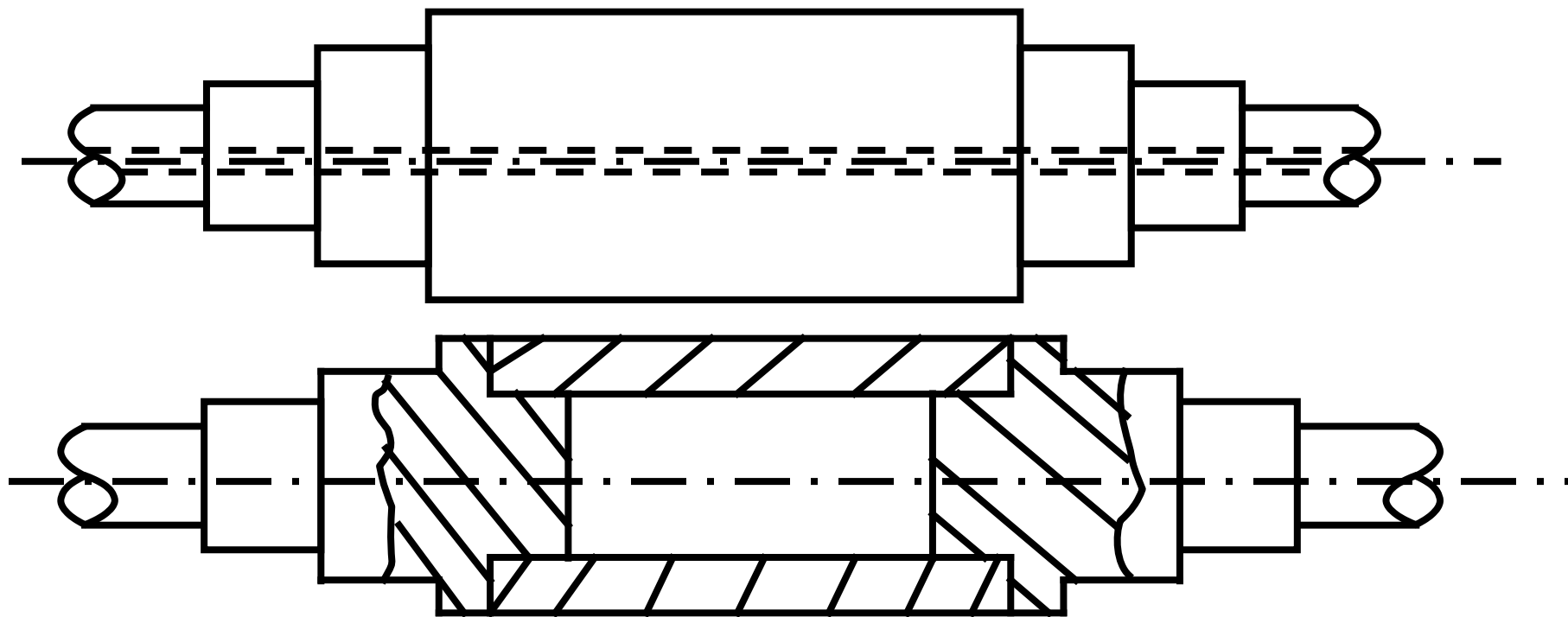
- 转子

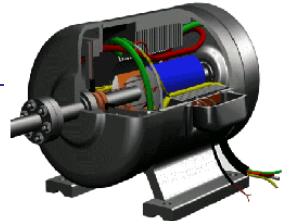
- 转子直径限制在1m左右
 - 受到转子材料机械强度的限制
- 增大电机容量
 - 就只能增加转子的长度,
 - 转子为细长的圆柱体
 - 长度 l 与外径 D 之比约为 $2.5 \sim 6$



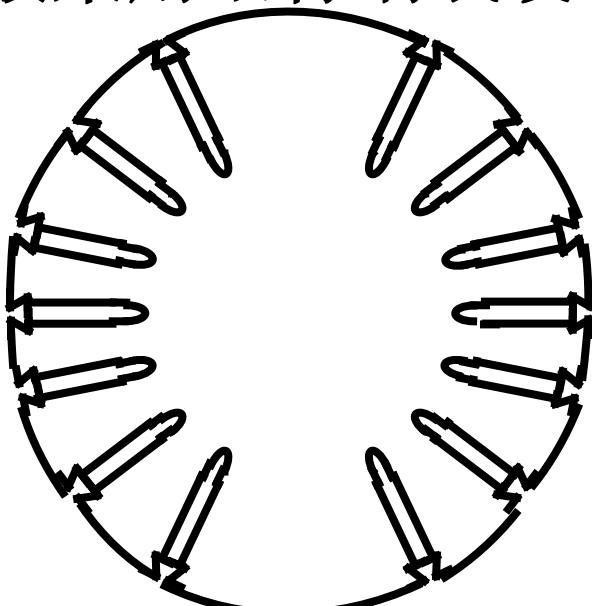


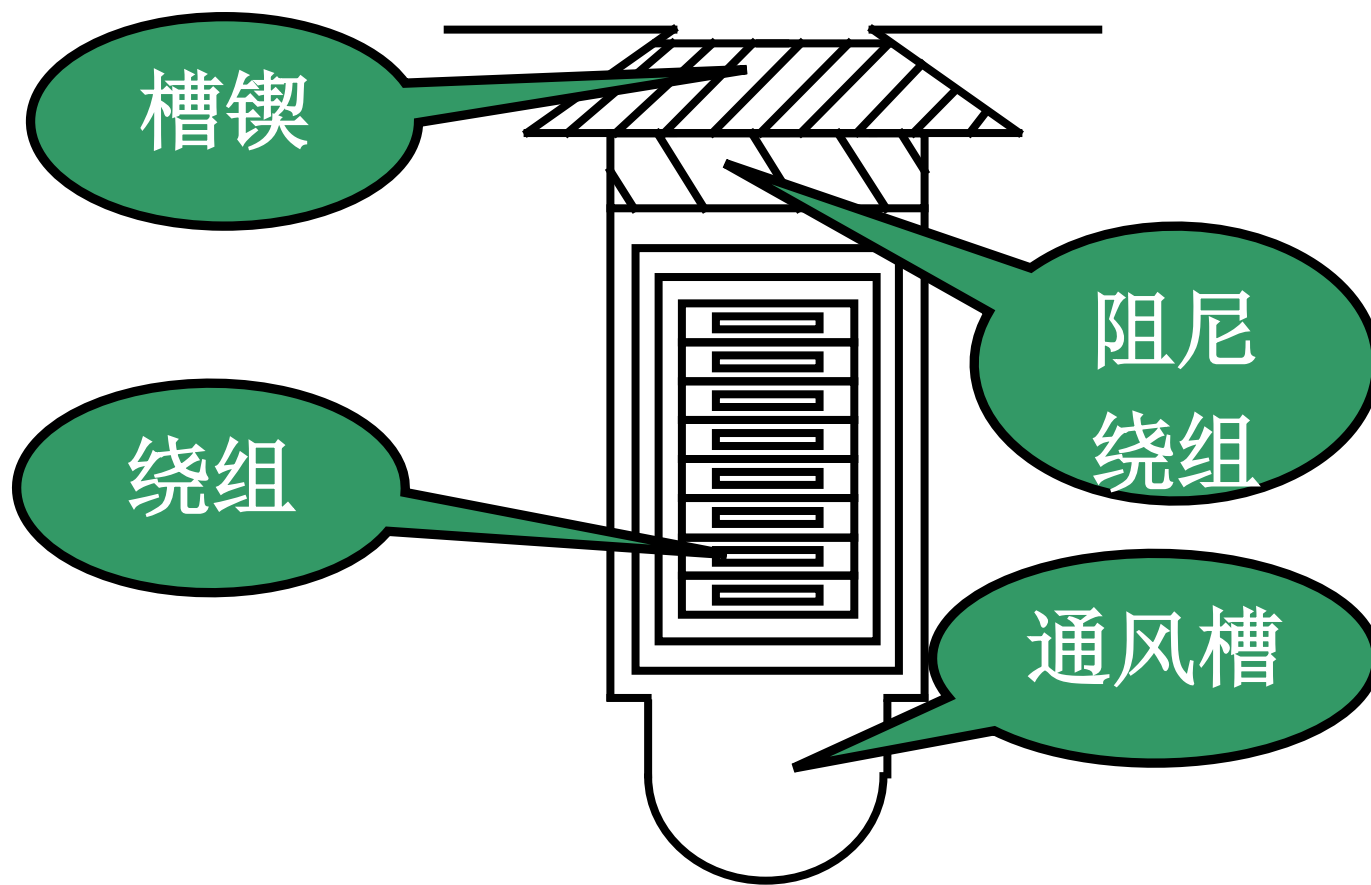
- 转子材料的要求极高
 - 采用含铬、镍和钼的特种合金钢
- 构造
 - 整块式和组合式两种





- 转子本体（中间最粗部分）
 - 表面用铣床铣出径向的槽
 - 激磁绕组即分布于这些槽中
 - 槽口用槽楔封住
 - 由于转速高，离心力大
 - 槽楔必须有足够的机械强度，并且不导磁，故一般采用铝青铜或硬铝等合金材料制成





两极汽轮发电机的转子槽剖面





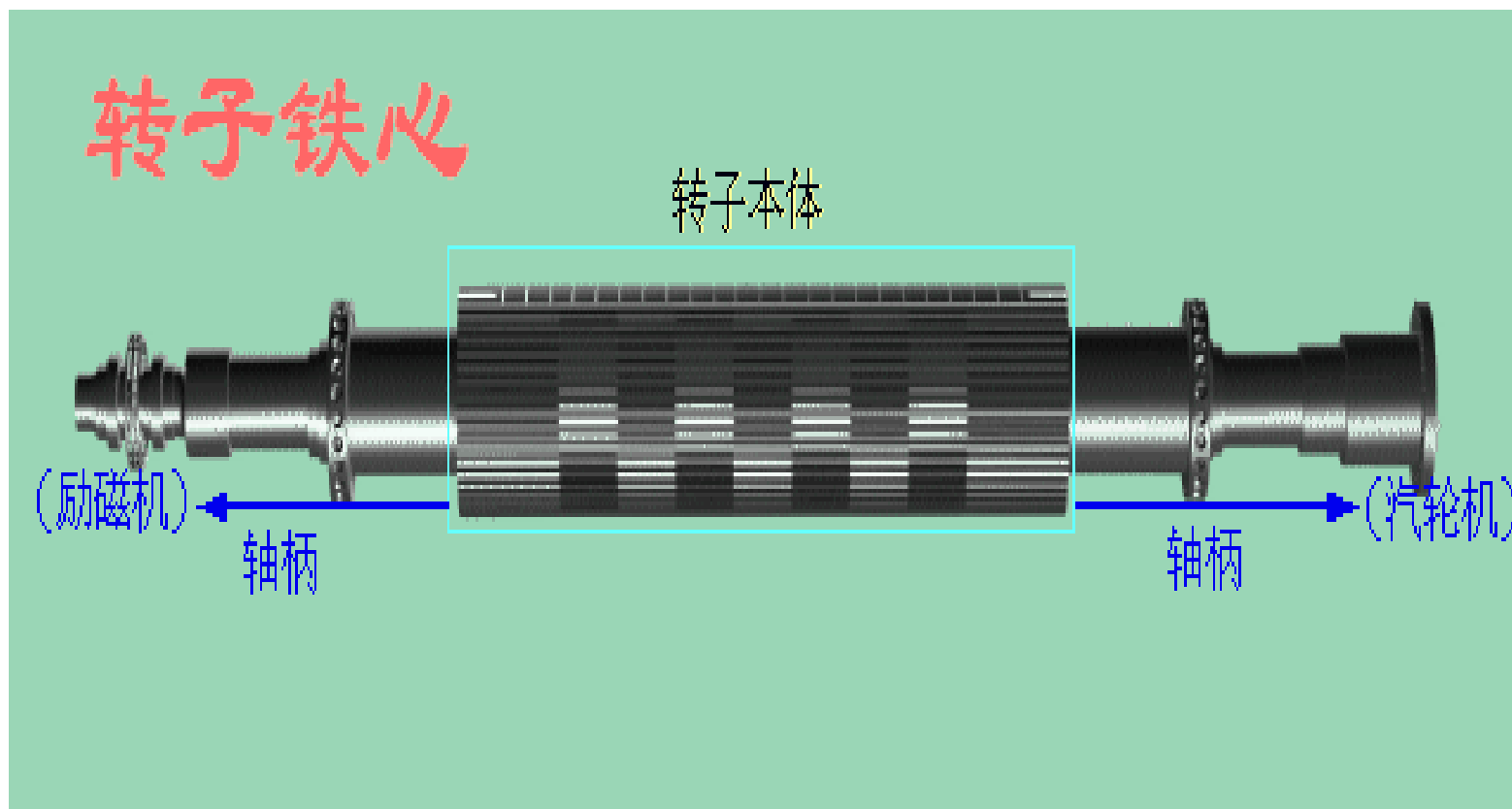
— 转子绕组

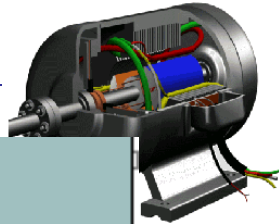
- 转子绕组用矩形截面的导体绕制
- 线圈跨度大小不同的同心式绕组

— 转轴

- 转轴按机械强度计算分成粗细不同的几段
- 转轴经联轴器与汽轮机相联的一端为**汽机端**
- 转轴经联轴器与励磁机相接的另一端为**励磁机端**
- 转速较快，转轴需要极好的平衡







转子铁心

转子本体

侧视图

第一种:励磁绕组槽,用于安放励磁线圈,形成转子磁场

第二种:阻尼绕组槽,安放阻尼绕组,提高发电机负序承载能力

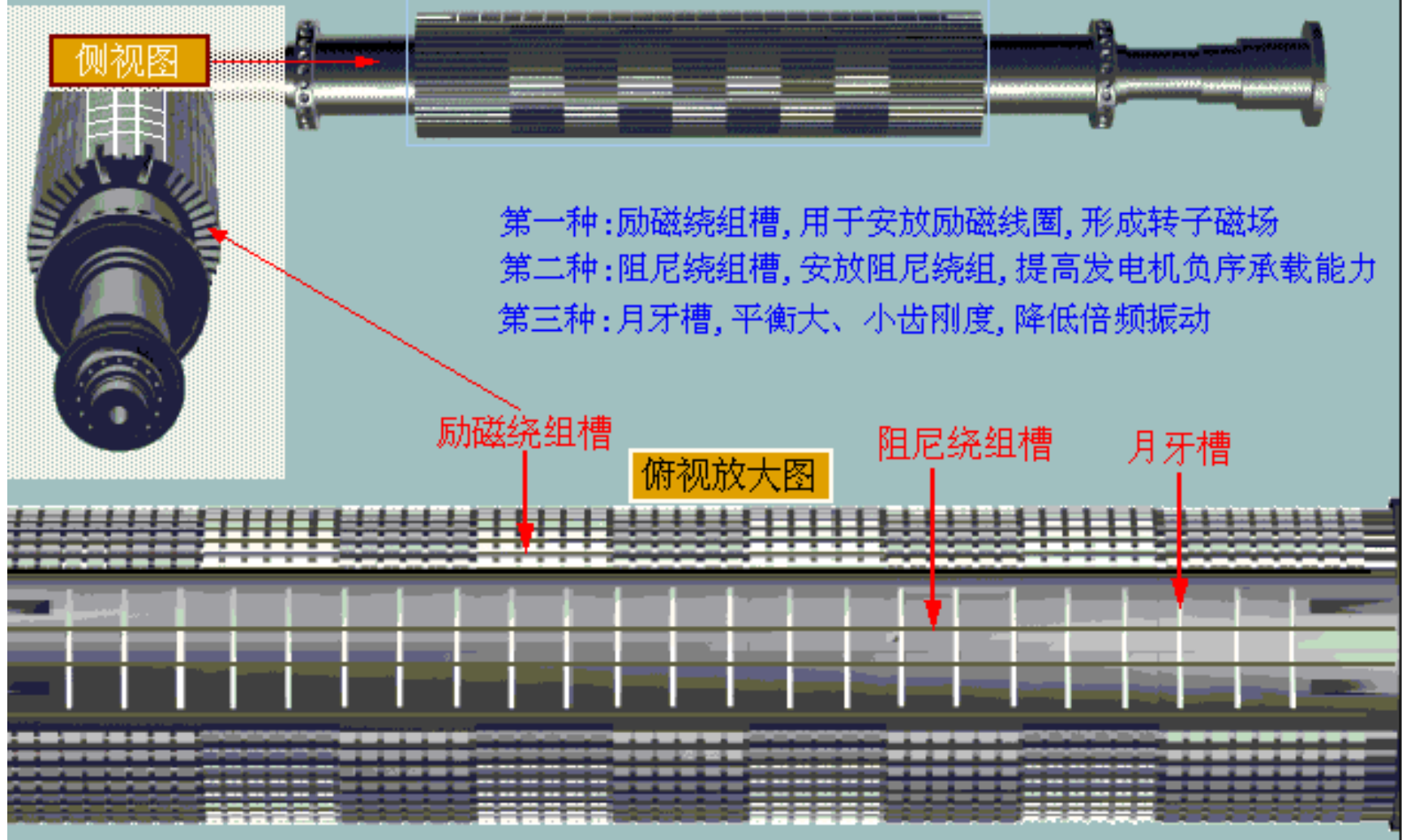
第三种:月牙槽,平衡大、小齿刚度,降低倍频振动

励磁绕组槽

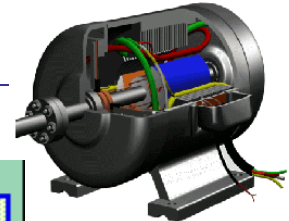
俯视放大图

阻尼绕组槽

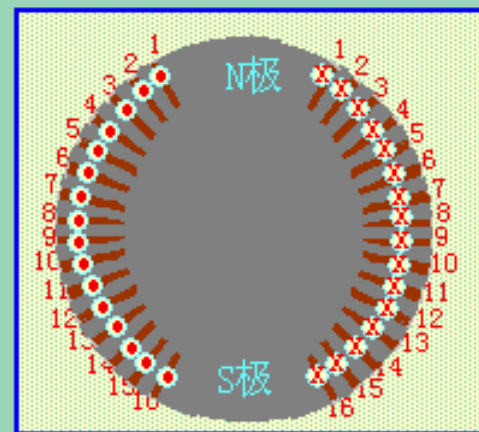
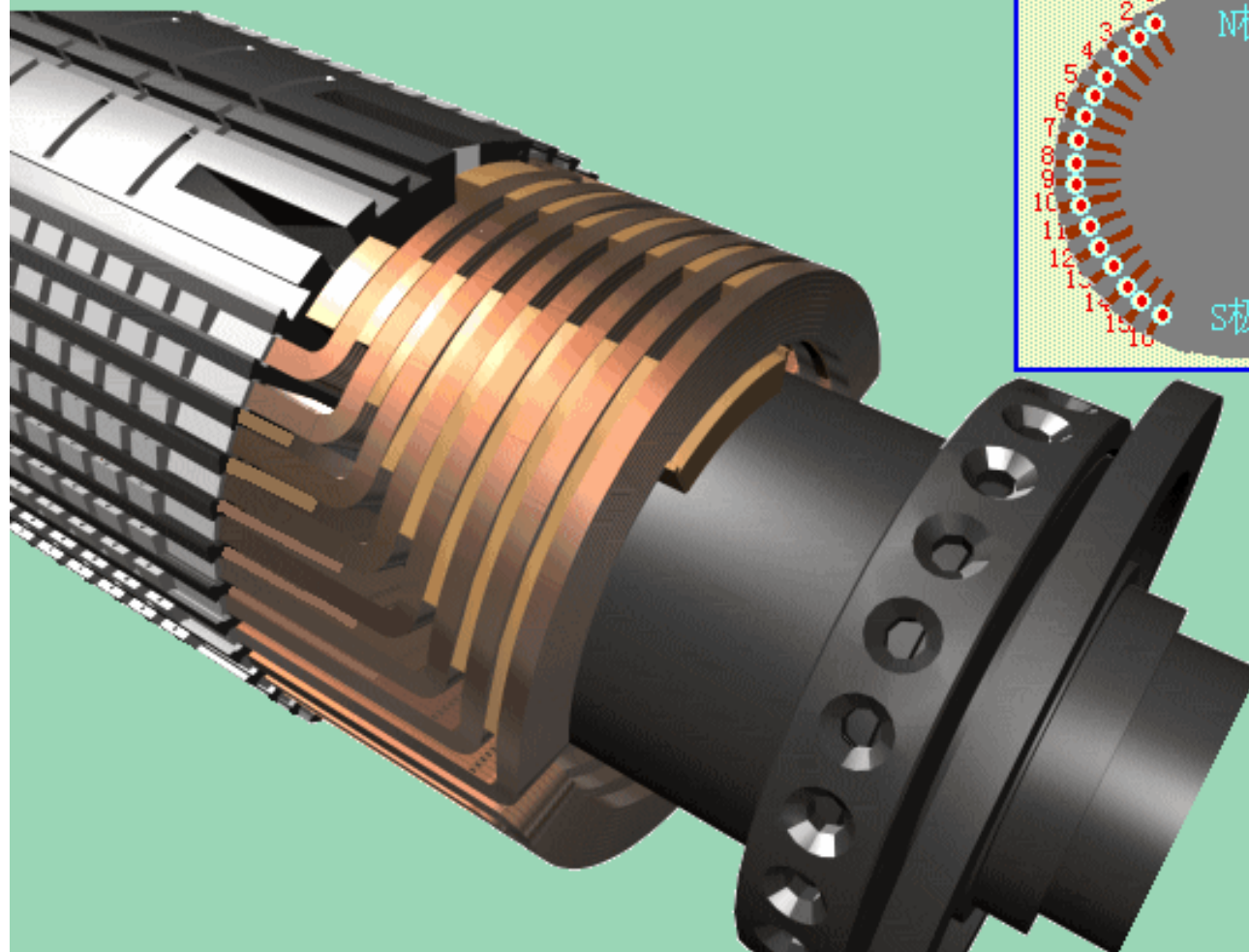
月牙槽



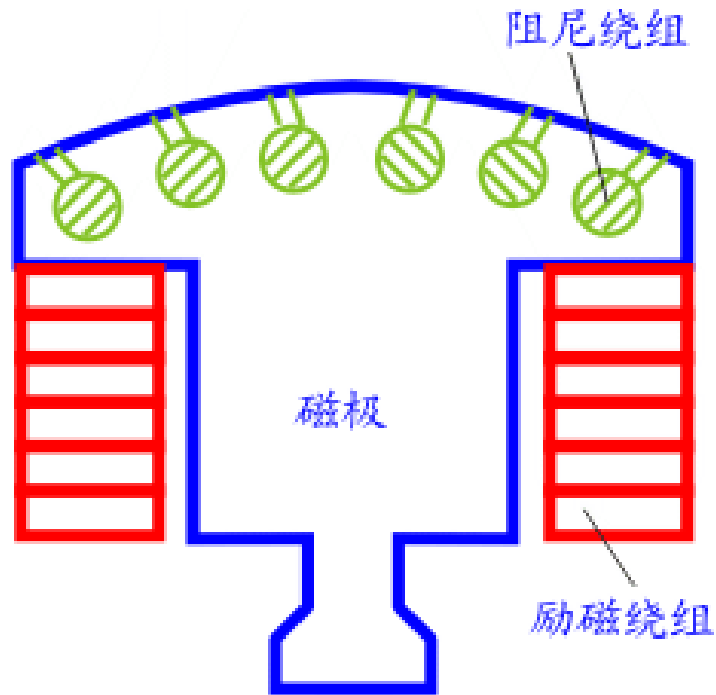
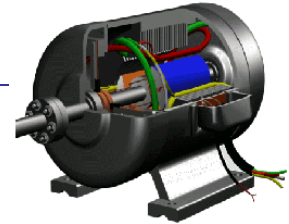
同步电机的结构



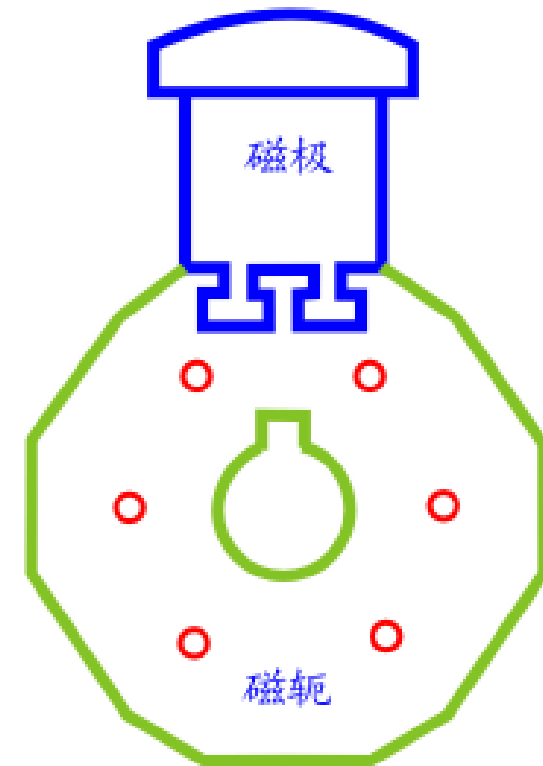
励磁绕组



同步电机的结构



凸极同步电机的磁极与励磁绕组



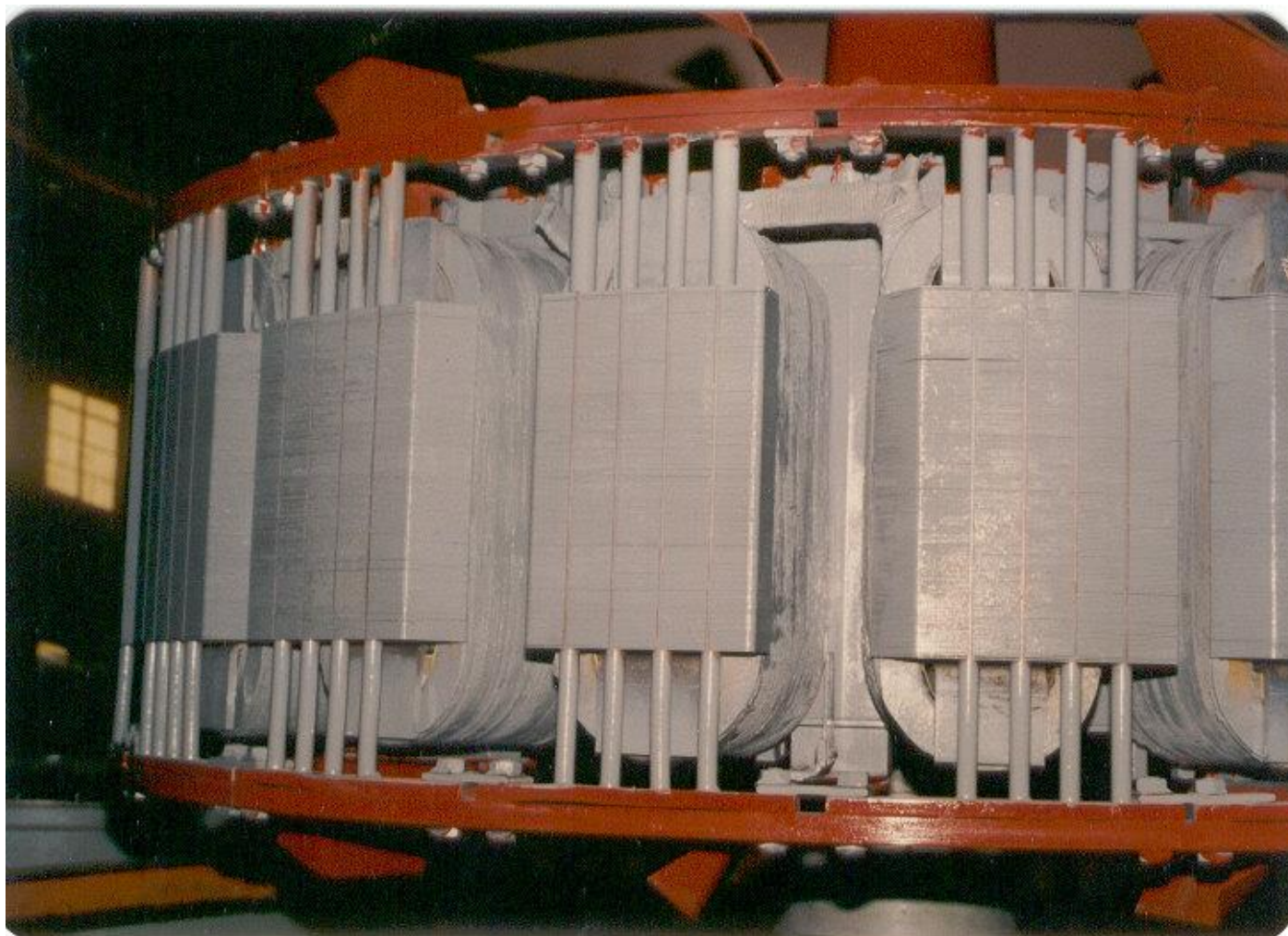
磁轭与磁极





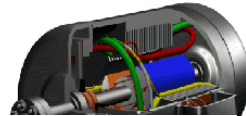
16极凸极同步电机转子





阻尼绕组





- 额定电压 U_N : 电机额定运行时定子的线电压, 单位为V或kV。
- 额定电流 I_N : 电机额定运行时定子的线电流, 单位为A。
- 额定功率因数 $\cos\varphi_N$: 电机额定运行时的功率因数。
- 额定效率 η_N : 电机额定运行时的效率。
- 额定容量 S_N : 对发电机, 是出线端额定视在功率, 单位为VA, kVA或MVA; 对调相机, 为线端额定无功功率, 单位为Var、kVar或MVar。

$$S_N = \sqrt{3}U_N I_N$$

- 额定功率 P_N :

对发电机为额定输出有功电功率。

$$P_N = S_N \cos\varphi_N = \sqrt{3}U_N I_N \cos\varphi_N$$

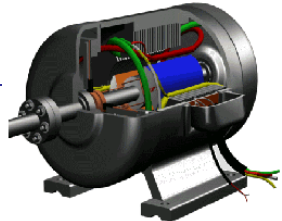
对电动机是轴上输出的额定机械功率。

$$P_N = S_N \cos\varphi_N \eta_N = \sqrt{3}U_N I_N \cos\varphi_N \eta_N$$

此外, 铭牌上还有

- 额定频率 f : 我国电网频率 $f=50\text{Hz}$ 。
- 额定转速 n_N : 电动机在额定电压、额定频率、轴端输出额定功率时, 转子的转速, 单位为r/min。
- 额定励磁电流 $I_{fN}(\text{A})$ 。
- 额定励磁电压 $U_{fN}(\text{V})$ 。



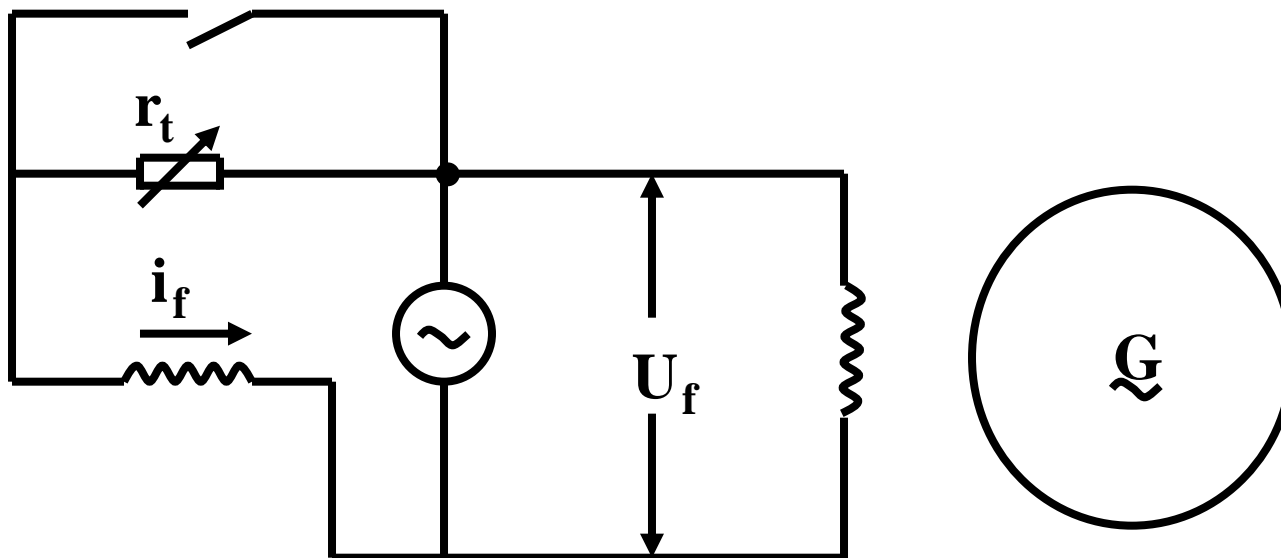


- 励磁系统主要应满足如下要求：
 - 调整以维持发电机端电压或电网电压的数值
 - 对发电机进行强力励磁来提高电力系统的稳定性
 - 实行强行减磁以限制发电机端电压过度增高
 - 快速灭磁和减磁以减少故障的损坏程度
 - 应能具有成组调节其无功功率的能力，使无功功率得到合理的分配
 - 励磁系统应有较快的反应速度，运行可靠，线路和设备结构简单，维修调整简便，电能损耗小，设备成本低、体积小



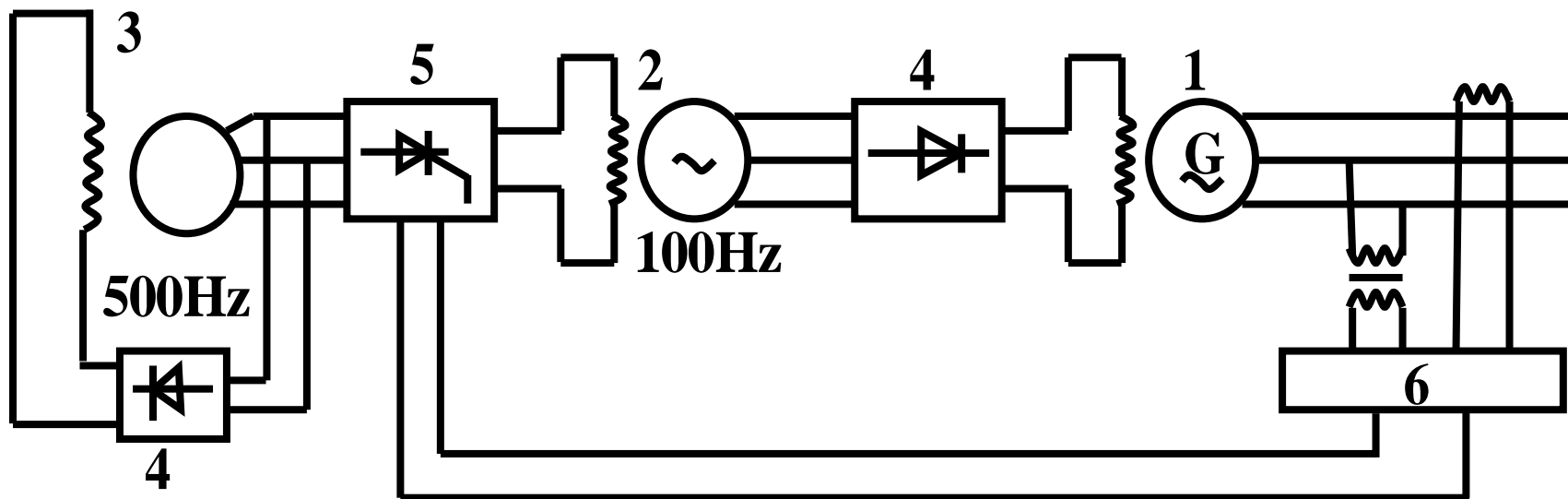


- 励磁系统
 - 直流励磁机励磁系统





- 交流机励磁整流励磁系统
— 静止整流励磁





— 旋转整流励磁

